

Aplicação de STATCOM em redes de distribuição de energia elétrica – Topologias e estratégias de controle para compensação de cintilação luminosa

Rômulo Miranda Lima de Souza¹ & Pedro Gomes Barbosa²

¹ - bolsista PIBIC/CNPq

² - D.Sc. Faculdade de Engenharia, departamento de Energia Elétrica

Abstract: Application of STATCOM in electric distribution networks – Topologies and control strategies to compensate flicker. This work presents a digital model of a Static Synchronous Compensator (STATCOM) based on Voltage Source Converters (VSC). The STATCOM is a reactive power compensator to be shunt connected to the electric power systems. It can be used to control a bus voltage or to compensate the power factor of the system. There are many schemes, proposed in the literature, to control the STATCOM. Since the development of analytical models of the STATCOM are not easy, in this work, it will be used the electromagnetic transient simulation package named ATP/EMTP (Alternative version of Electromagnetic Transients Program) to model and to simulate the compensator and the power system. The ATP has a graphic interface named ATPDraw that makes the circuit assembly easier. This graphic interface also simplifies the modeling of the control systems through the TACS (Transient Analysis of Control System) or MODELS environments. The MODELS is a general-purpose description language, supported by a set of simulation tools, for describing the dynamic behavior of complex physical systems. Also, it will be investigated the utilization of a modulation strategy named space vector pulse width modulation (SVPWM) to control the semiconductor switches of the VSC. This modulation scheme has been widely used to control static power converter with microcontrollers and Digital Signal Processors (DSP).

Resumo: Este trabalho apresenta um modelo digital de um compensador estático síncrono (STATCOM) baseado em conversor fonte de tensão - VSC (do inglês “*Voltage Source Converter*”). O STATCOM é um compensador de energia reativa que opera conectado em derivação com o sistema elétrico. Ele pode ser utilizado para controlar a tensão de um barramento ou compensar o fator de potência de uma carga. Existem na literatura diferentes estratégias propostas para controlar o STATCOM. Como o desenvolvimento de modelos analíticos para o STATCOM não é trivial fez-se a opção de utilizar o programa de transientes eletromagnéticos ATP/EMTP (do inglês “*Alternative version of Electromagnetic Transients Program*”) para modelar e simular o STATCOM e o sistema de potência. O ATP possui uma interface gráfica chamada ATPDraw que facilita a tarefa de montagem dos circuitos na qual pode-se também incorporar os sistemas de controle através do ambiente TACS (do inglês “*Transient Analysis of Control System*”) ou do ambiente MODELS. Neste último os algoritmos de controle são escritos em um ambiente próprio usando uma linguagem de programação estruturada. Em paralelo com a modelagem do conversor foi investigada a estratégia denominada modulação PWM vetorial - SVPWM (do inglês “*Space Vector Pulse Width Modulation*”) para controlar as chaves semicondutoras do VSC. Esta estratégia de

modulação tem sido usada com vantagens para controle de conversores estáticos a partir de microcontroladores e processadores digitais de sinais - DSP (do inglês “*Digital Signal Processor*”).

1 Introdução

A sempre crescente demanda por energia elétrica no Brasil e no mundo tem forçado engenheiros e cientistas pesquisarem e desenvolverem novos equipamentos para melhorar a eficiência dos sistemas elétricos e aumentar a oferta de energia. Dentro deste cenário, a compensação de energia reativa através de controladores eletrônicos de potência tem sido vista como uma alternativa atrativa para aumentar a controlabilidade das redes de transmissão e distribuição em corrente alternada (HINGORANI, 1988) bem como reduzir as perdas dos sistemas elétricos de potência.

O compensador estático síncrono - STATCOM (do inglês, “*STATic*

synchronous COMPensator”) é um exemplo destes novos controladores estáticos (BARBOSA, 2000), (WATANABE et al, 1998) e (WATANABE et al, 2004). A Figura 1 mostra o diagrama de blocos de um STATCOM. Este compensador é composto por conversor um VSC (do inglês, “*Voltage Source Converter*”), seu bloco de controle e um capacitor CC conectado em seus terminais CC. O STATCOM é normalmente conectado em derivação com o sistema elétrico através de um transformador. Nesta figura os sinais de controle V_c^* e δ^* representam as amplitude e fase da tensão que o STATCOM deve sintetizar em seus terminais CA.

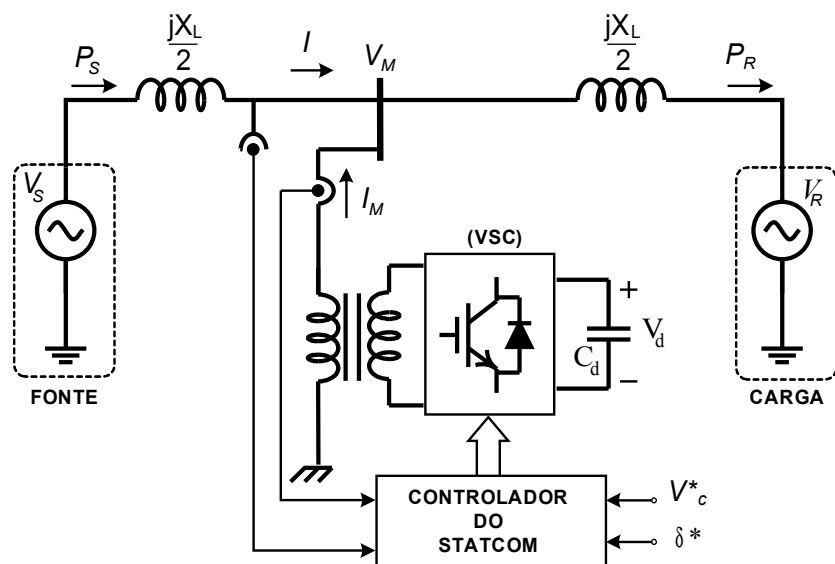


Figura 1- Diagrama esquemático do compensador estático síncrono (STATCOM).

Dentre as principais estratégias usadas para controlar as tensões geradas pelos STATCOM podem-se citar: (i) chaveamento em onda retangular, (ii) chaveamento com modulação por largura de pulso (PWM).

Os STATCOMS multipulso são os mais antigos e por isso também denominados como “primeira geração”. Estes compensadores usam em sua estrutura GTO (do inglês, “*Gate Turn-off Thyristor*”) como chave semicondutora autocomutada. Devido ao fato dos GTOs não poderem ser comutados com frequências acima de uma ou duas centenas de Hz, estes compensadores são chaveados na frequência da rede e geram em seus terminais tensões trifásicas com forma de onda retangulares. Desse modo, para eliminar os harmônicos gerados pela operação dos VSCs, vários conversores têm suas tensões chaveadas combinadas através de vários transformadores defasadores (zigzag).

Dois STATCOMs multipulso baseados em GTOs estão em operação desde 1991 e 1995, no Japão (MORI et al, 1993) e nos EUA (SCHAUDER et al, 1997), respectivamente. O STATCOM japonês usa três VSCs monofásicos para formar um VSC trifásico de 6-pulsos com 10 MVA. No total, 8 conjuntos destes VSCs trifásicos são conectados em série através de transformadores defasadores para formar um conversor de 80 MVA. Já o STATCOM americano é baseado em 8 conjuntos de conversores trifásicos. Devido ao grande número de pulsos, a forma de onda de corrente de saída destes conversores é praticamente senoidal e nenhum filtro é usado em nenhum dos dois casos. Contudo esses transformadores elevam o custo e aumentam o volume desses compensadores. Por este motivo

estão sendo preteridos por estruturas mais modernas.

A segunda geração de STATCOMs utiliza modulação por largura de pulsos PWM (do inglês, “*Pulse Width Modulation*”) (JOHN et al, 2004), (OSKOUUI et al, 2006), (REED et al, 2001) e (SCARFONE et al, 2003). Estes compensadores usam em sua estrutura chaves autocomutadas tipo IGBT (do inglês, “*Insulated Gate Bipolar Transistor*”) ou IGCT (do inglês, “*Integrated Gate Commutated Thyristor*”) e podem operar com frequências de chaveamento mais altas (até aproximadamente 2 kHz).

Em todos os trabalhos referenciados anteriormente, o principal objetivo dos compensadores é realizar compensação rápida de energia reativa visando o controle da tensão da rede, principalmente após períodos de contingências críticas. Desse modo, o principal objetivo deste trabalho é investigar o desempenho de um STATCOM-PWM, baseado em chaves semicondutoras IGBTs, para controlar a tensão de um barramento de um sistema elétrico de potência (SEP). O compensador estático síncrono juntamente com seus controles foram implementados no programa de transitórios eletromagnéticos ATP/EMTP (“*Alternative version of Electromagnetic Transientes Program*”). Para controlar a amplitude, a fase e a frequência da tensão sintetizada pelos VSC que compõem o STATCOM foi utilizada uma estratégia de modulação vetorial (SVPWM – do inglês, “*Space Vector - Pulse Width Modulation*”). A modulação SVPWM tem como principal característica a facilidade da implementação em processadores digitais de sinais (DSP). Além disso o SVPWM tem a vantagem de otimizar o número de comutações das

chaves semicondutoras do VSC (PINHEIRO et al, 2005).

1 Princípios básicos da operação do STATCOM

A Figura 2 mostra um diagrama simplificado onde o sistema de potência da

Figura 1 foi representado por uma fonte equivalente atrás de uma reatância X_L e o STATCOM foi representado por um bloco cuja tensão fundamental é o fasor de tensão V_I (valores em negrito representam fasores).

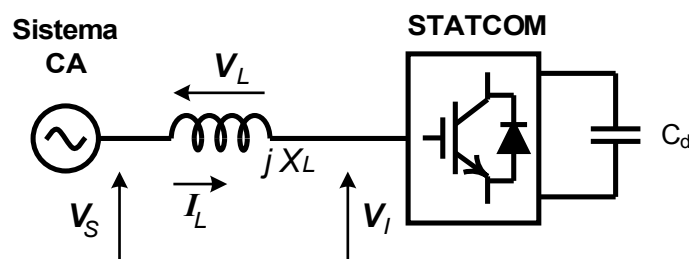


Figura 2 – Diagrama simplificado do STATCOM conectado a um sistema CA.

Desprezando os harmônicos gerados pelo chaveamento do conversor pode-se escrever as seguintes expressões para as

potências ativa (P_c) e reativa (Q_c) nos terminais do STATCOM:

$$P_c = \frac{V_S V_I}{X_L} \sin \delta \quad (0)$$

e,

$$Q_c = \frac{V_S}{X_L} [V_S - V_I \cos \delta]. \quad (0)$$

onde δ é o ângulo de defasagem medido entre os fasores das tensões V_S e V_I .

A Figura 3 mostra três diagramas fasoriais onde a tensão V_S está em fase com a tensão V_I gerada pelo STATCOM, ou seja, $\delta = 0$. Nesta situação tem-se que $P_c = 0$ e quando a amplitude de V_S é igual a amplitude da tensão V_I tem-se que a corrente de linha I_L é zero (Figura 3(a)). A Figura 3 (b) mostra o caso quando a amplitude da tensão do STATCOM (V_I) é

menor que a tensão do sistema V_S . Neste caso, como a corrente de linha é atrasada de 90° em relação à tensão sobre a reatância (X_L), tem-se que I_L é atrasada em relação a tensão V_S do sistema CA e de (0) tem-se que a potência reativa nos terminais do STATCOM é positiva. Por outro lado, Figura 3 (c), quando a amplitude da tensão V_I (STATCOM) é maior a tensão V_S , a

corrente de linha I_L fica atrasada da tensão V_S e o STATCOM gera potência reativa em seus terminais, isto é, $Q_c < 0$. Em resumo, a potência reativa nos terminais do STATCOM pode ser controlada a partir do controle da magnitude da tensão V_I sintetizada pelo compensador.

A Figura 4(a) mostra o diagrama fasorial para o caso em que a tensão V_I está atrasada em relação à tensão V_S . Neste caso a diferença de fase ϕ é positiva e a corrente de linha resultante neste caso fica em fase com a tensão V_S . Essa característica força um fluxo de potência ativa do sistema CA para o STATCOM que carrega o capacitor

C_d , aumentando a tensão CC e consequentemente a tensão CA do STATCOM. Já no caso da Figura 4(b), a tensão V_I está adiantada em relação a tensão V_S . A diferença de fase ϕ é negativa e a corrente I_L fica em defasada de 180° em relação a tensão V_S . Essa característica força um fluxo de potência do STATCOM para o sistema CA que por sua vez descarrega o capacitor C_d , reduzindo a tensão CC e consequentemente a tensão CA do compensador. Portanto, o controle do ângulo de fase ϕ permite controlar a tensão do capacitor C_d e a amplitude da tensão CA sintetizada pelo STATCOM.

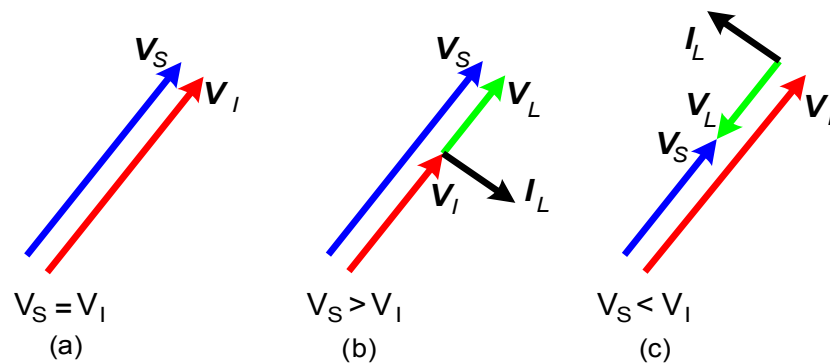


Figura 3 – Controle da potência reativa nos terminais do STATCOM: (a) compensação nula, (b) compensação indutiva e (c) compensação capacitiva.

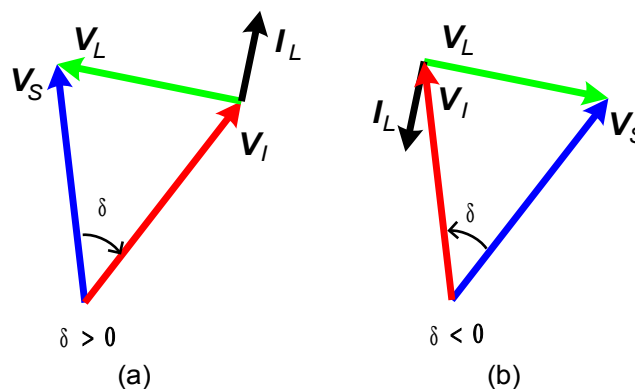


Figura 4 – Controle da potência ativa nos terminais do STATCOM.

Pelo exposto, se o STATCOM for baseado em conversores multipulso que não utilizam modulação PWM, a tensão sobre o capacitor CC do conversor deve ser controlada para variar a amplitude da tensão CA sintetizada pelo VSC. Por outro lado, se o STATCOM utiliza uma estratégia de chaveamento PWM é possível controlar a amplitude e a fase da tensão de saída a partir de uma tensão CC fixa. Neste caso, apesar da amplitude da tensão CC ser constante os princípios discutidos nesta seção continuam válidos (WATANABE et al, 2007).

2 O conceito de vetor espacial

O conceito de vetor espacial constitui uma ferramenta poderosa para a modelagem e a análise de sistemas elétricos trifásicos tais como: máquinas elétricas, conversores estáticos, etc. Em geral o comportamento desses sistemas é descritos

a partir de um conjunto de equações algébricas-diferenciais que relacionam as tensões e correntes trifásicas em cada elemento do sistema.

Como exemplo considere o conversor estático mostrado na Figura 5. Este conversor trifásico, formado por seis IGBTs com seis diodos conectados em antiparalelo, é a base do STATCOM apresentado neste trabalho. Nesta figura a fonte de energia, normalmente conectada aos terminais CC do conversor nas aplicações industriais, foi substituída por um capacitor CC carregado com uma tensão V_d . Esta substituição só é possível se o conversor for usado para injetar ou absorver potência reativa em seus terminais CA. Entretanto, conforme discutido na seção anterior, o conversor estático poderá também absorver ou fornecer uma certa quantidade de potência ativa em seus terminais CA. Esta característica é fundamental para controlar a tensão CC sobre o capacitor C_d .

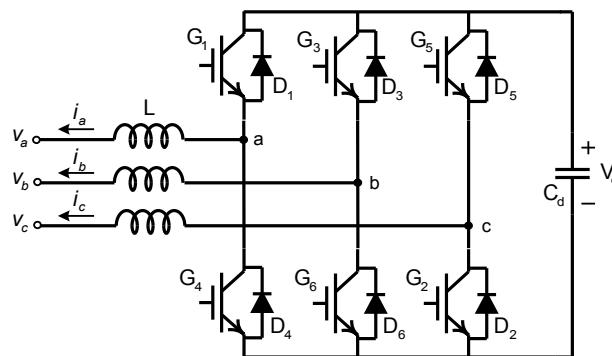


Figura 5 – Topologia de conversor VSC com tensão de saída com 2 níveis.

Pode-se mostrar que um conjunto de tensões ou correntes trifásicas instantâneas podem ser combinados conforme mostrado a seguir:

$$\bar{v} = v_a e^{j0} + v_b e^{+j(2\pi/3)} + v_c e^{+j(4\pi/3)}, \quad (0)$$

onde \bar{v} é denominado vetor espacial de tensão em (V); v_a , v_b e v_c são as tensões trifásicas.

Principia

A Figura 6 (a) mostra um exemplo onde as tensões trifásicas nos terminais do VSC são senoidais, equilibradas e simétricas. Neste exemplo foram desprezados os harmônicos gerados pelo chaveamento do conversor. A Figura 6 (b) mostra a representação do vetor espacial das tensões obtida a partir de (0). A posição do vetor espacial \bar{V} mostrada na Figura 6 (b) corresponde ao instante de

tempo indicado pela linha tracejada da Figura 6 (a). De (0) tem-se que, com o passar do tempo, o vetor \bar{V} altera sua fase descrevendo uma trajetória circular no plano abc cuja velocidade angular (ω) é proporcional a frequência elétrica das tensões geradas. Já a amplitude desse vetor espacial terá um valor constante e igual a $3/2$ do valor da amplitude máxima da tensão de uma das fases.

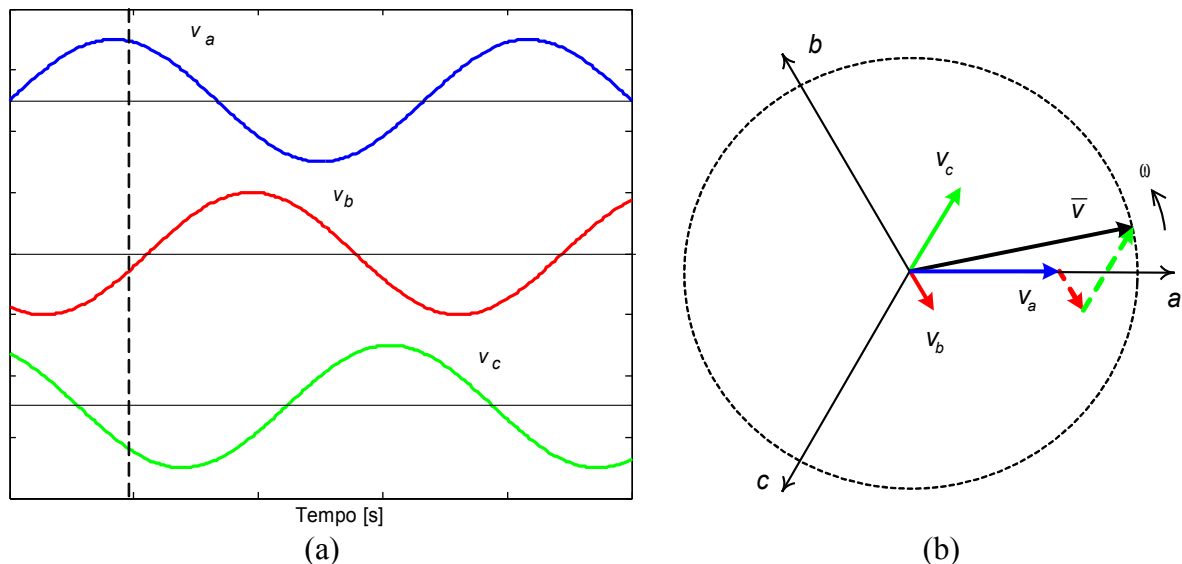


Figura 6 – Vetor espacial de tensão: (a) tensões trifásicas instantâneas e (b) representação espacial.

Da observação da Figura 6 (b) pode-se concluir que não é necessário usar um sistema trifásico de eixo para representar corretamente o vetor espacial \bar{V} no plano. A Figura 7 mostra a projeção do vetor

espacial de tensão num sistema de eixos ortogonais $\alpha\beta$. Neste novo sistema de eixos, as componentes do vetor espacial nas direções α e β são facilmente como mostrado a seguir:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (0)$$

onde v_α e v_β são as projeções do vetor espacial \bar{V} nos eixos α e β , respectivamente.

Já a transformação inversa, isto é, do sistema de eixos $\alpha\beta$ para o sistema de eixos abc , é dada por:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{2}{3} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (0)$$

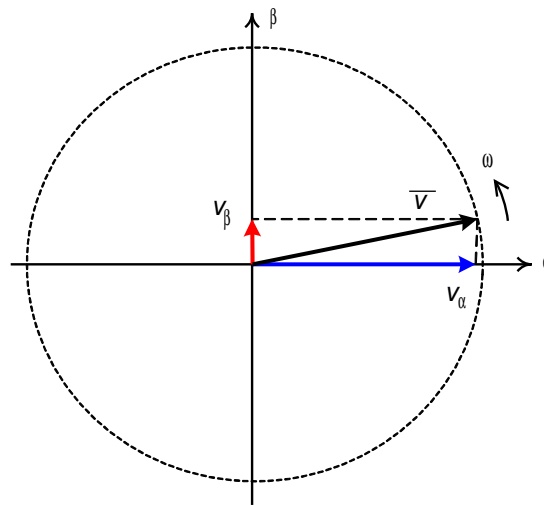


Figura 7 – Decomposição do vetor espacial de tensão no sistema de eixos ortogonais $\alpha\beta$.

Na prática porém as tensões trifásicas geradas nos terminais do VSC da Figura 5 são não-senoidais. Isto acontece porque os terminais de saída do conversor são conectados, através dos IGBTs de cada ramo, aos pólos positivo e negativo do capacitor CC. Desse modo, usando o terminal negativo do capacitor CC como referência pode-se redesenhar o VSC da Figura 5 conforme mostrado na Figura 8 (a). Nesta figura cada ramo é modelado por uma chave que pode assumir dois estados 1 (um) ou 0 (zero), para o caso do IGBT superior ou inferior estar conduzindo, respectivamente. Esse tipo de modelagem matemática permite determinar as tensões trifásicas de saída do VSC a partir do conhecimento dos estados das chaves de

cada ramo ou dos valores das funções de chaveamento S_a , S_b e S_c .

Pelo exposto, a tensão da fase “a” do VSC em relação ao terminal negativo do capacitor CC pode assumir dois valores distintos, $v_a = V_d$ ou $v_a = 0$ (zero) para $S_a = 1$ ou $S_a = 0$ (zero), respectivamente. Considerando um comportamento semelhante para as fases “b” e “c” porém defasadas de $-2\pi/3 \text{ rad}$ e $-4\pi/3 \text{ rad}$, respectivamente, tem-se que o número de posições possíveis para o vetor espacial de tensão do VSC é $2^3 = 8$ (oito).

A Figura 9 (a) mostra a representação dos oito estados possíveis para o vetor espacial da tensão de saída do VSC. Os subíndices associados a cada vetor de tensão do conversor indicam os

estados das funções de chaveamento de cada ramo. Já a Figura 9 (b) mostra uma tabela com os seis estados ativos para a tensão sintetizada pelo conversor. Nessa tabela não estão representados os dois

estados nulos (V_{000} a V_{111}). Esses dois estados nulos são conseguidos quando os três IGBTs inferiores ou os três IGBTs superiores do VSC estão fechados.

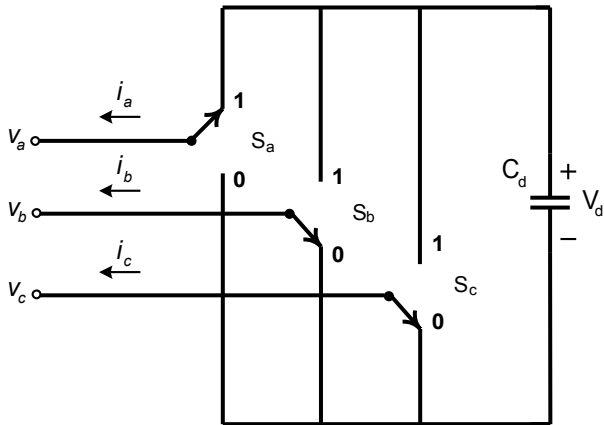
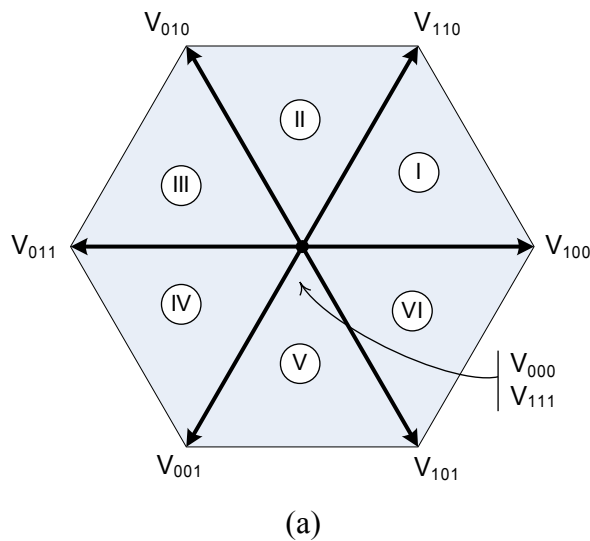


Figura 8 – Modelagem do conversor de tensão usando chaves ideais.



Setor	$S_a S_b S_c$	Tensão
I	100	V_{100}
II	110	V_{110}
III	010	V_{010}
IV	011	V_{011}
V	001	V_{001}
VI	101	V_{101}

Figura 9 – (a) Representação dos vetores de tensão sintetizados pelo VSC; (b) tabela com os estados ativos e o valor do vetor espacial sintetizado pelo VSC.

3 A modulação PWM vetorial

A técnica de modulação de vetorial (SVPWM) é um método para determinação

do padrão de chaveamento PWM que permite reduzir o número de comutações dos ramos dos VSC trifásicos e diminuir o esforço sobre as chaves semicondutoras do

conversor (PINHEIRO et al, 2005), (BUSO, 1999) e (VILLALVA, 2005).

Como mencionado anteriormente este método é facilmente implementado em processadores digitais de sinais (DSP) e microcontroladores. Devido ao seu desempenho superior, quando comparado com outras técnicas PWM, a modulação vetorial (ou do inglês “*space vector modulation*”) tem tido sua aplicação cada vez mais difundida nos dias de hoje.

Na Seção 2 foi mostrado que devido a operação discreta do conversor VSC, o

vetor espacial obtido a partir das tensões trifásicas sintetizadas pelos VSC descreve uma trajetória hexagonal no plano α - β conforme mostrado na Figura 9 e não uma trajetória circular conforme mostrado na Figura 7. Logo, a síntese de um dado vetor espacial \bar{V}^* a partir de um conversor estático pode ser conseguida utilizando os oito vetores mostrados na Figura 10. Na prática porém, o vetor de tensão \bar{V}^* pode ser sintetizado apenas pelos vetores de tensão V_1 , V_2 e V_3 que definem o setor do hexágono em que \bar{V}^* está localizado, conforme mostrado na Figura 10 (b).

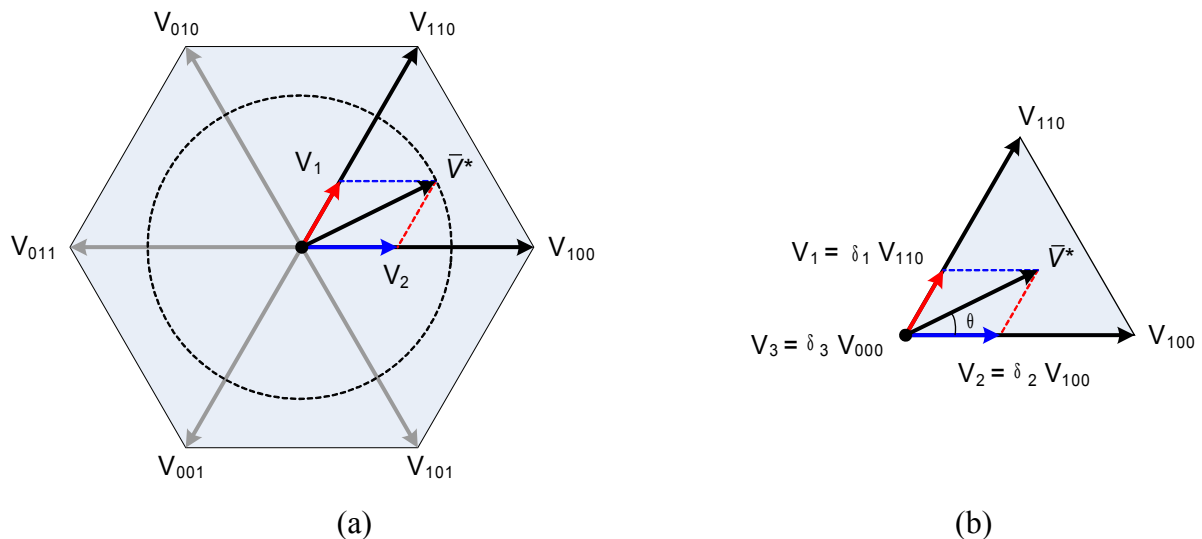


Figura 10 – (a) Síntese do vetor espacial \bar{V}^* a partir dos vetores auxiliares V_1 , V_2 e V_3 ; (b) detalhe do setor (I) do hexágono.

Do detalhe mostrado na Figura 10(b) pode-se escrever que \bar{V}^* é igual a soma dos vetores $V_1 + V_2 + V_3$. Sendo que

as projeções V_1 e V_2 são calculados, para o primeiro setor do hexágono a partir das relações:

$$\frac{V_1}{\sin \theta} = \frac{\bar{V}^*}{\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right)} \quad (0)$$

e,

$$\frac{V_2}{\sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)} = \frac{\bar{V}^*}{\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right)}. \quad (0)$$

Contudo só é possível gerar os vetores de tensão V_{110} , V_{100} e V_{000} com o VSC. Assim as tensões auxiliares V_1 , V_2 e V_3 podem ser obtidas ponderando os vetores V_{110} , V_{100} e V_{000} pelos os tempos \square_1 , \square_2 e \square_3

respectivamente. Então, depois de calculado as projeções de \bar{V}^* nas direções de V_{110} e de V_{100} , pode-se calcular os tempos em que o VSC deve permanecer em cada estado a partir de:

$$\delta_1 = \frac{V_1}{V_{110}} \quad (0)$$

e,

$$\delta_2 = \frac{V_2}{V_{100}}. \quad (0)$$

As projeções do vetor \bar{V}^* para os demais setores do hexágono da Figura 10 são calculadas da mesma maneira que as mostradas acima porém sempre medindo o ângulo \square relação ao vetor antecessor que define o setor do hexágono.

Determinados os períodos \square_1 e \square_2 a partir de (0) e (0) pode-se calcular o período \square_3 , durante o qual a tensão de saída do VSC ficará no estado nulo (V_{000} ou V_{111}), como mostrado a seguir:

$$\delta_3 = 1 - \delta_1 - \delta_2 \quad (0)$$

De posse dos instantes \square_1 , \square_2 e \square_3 passa-se para etapa de modular as larguras dos pulsos aplicados aos IGBTs do conversor para sintetizar o vetor de tensão desejado. Três estratégias básicas são possíveis de serem usadas. A Figura 11 mostra o padrão de chaveamento gerado pela estratégia adotada neste trabalho. O período de chaveamento do conversor (T_s) é dividido ao meio, resultando em dois semiperíodos de tamanhos idênticos e iguais a T_C . Para cada semiperíodo T_C , as funções de chaveamento S_a , S_b e S_c assumem os valores 0 e 1 de acordo com os tempos \square_1 , \square_2 e \square_3 . Diferentemente do esquema

mostrado na Figura 10 (b), o padrão de chaveamento mostrado na Figura 11 usa as duas tensões V_{000} e V_{111} para sintetizar o estado nulo. Contudo para manter a mesma ponderação dada por (0) o ângulo \square_3 é dividido ao meio e o vetor nulo é sintetizado no início e no final do período T_C usando os estados V_{000} e V_{111} , respectivamente.

Determinado um chaveamento do conversor o vetor espacial da tensão \bar{V}^* é amostrado novamente, determinado o setor em que se localiza e calculado os novos períodos \square_1 , \square_2 e \square_3 em que as tensões deverão ser ponderadas. Finalmente o

padrão de chaveamento é repetido sucessivamente, conforme mostrado na Figura 11, gerando um conjunto de tensões

trifásicas com amplitude e fase controladas nos terminais de saída do STATCOM PWM.

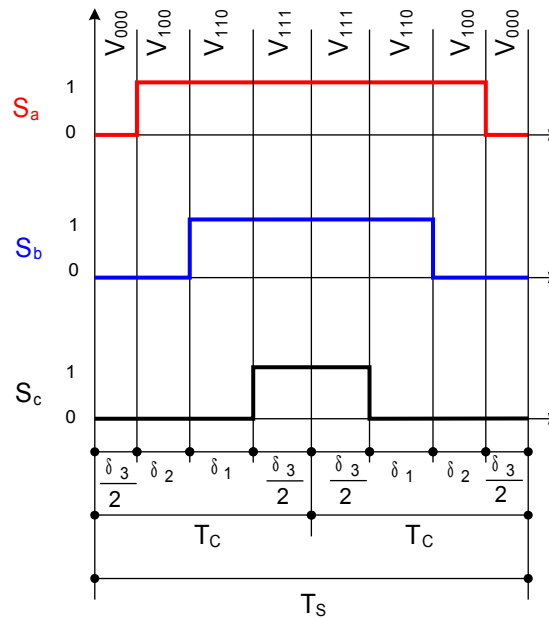


Figura 11 – Padrão de chaveamento para um período de amostragem.

4 Controlador do STATCOM PWM com modulação vetorial

Na implementação do controlador do STATCOM foi desenvolvido um algoritmo para controlar as tensões de saída do conversor estático baseada nas discussões apresentadas na Seção . O controlador do STATCOM PWM gera um conjunto de tensões trifásicas cujas amplitudes e fases são controladas de maneira a ajustar os fluxos de potências ativa e reativa nos

terminais do compensador. Nesse sentido, enquanto que a amplitude das tensões geradas pelo VSC é usada para controlar a potência reativa de compensação, o ângulo de fase é usado para controlar a tensão CC do capacitor do conversor.

Para facilitar a compreensão do algoritmo de controle considere que pode-se definir um fator de modulação da amplitude para as tensões geradas pelo STATCOM controlado a partir de uma estratégia SVPWM como se segue:

$$m^* = \frac{\bar{V}^*}{V_{m\acute{a}x}} \quad (0)$$

Principia

onde \bar{v}^* é a amplitude vetor espacial que o VSC deve sintetizar em seus terminais de saída; $\bar{v}_{m\acute{a}x} = V_d \cos(\pi / 6)$ é amplitude máxima do vetor espacial que pode ser sintetizado pelo VSC e V_d é a tensão CC sobre o capacitor do conversor.

Como $\bar{v}^* = (3/2)\hat{V}_{ref}$, a relação (0) pode ser reescrita como:

$$\hat{V}_{ref} = m^* \left(\frac{\sqrt{3}V_d}{3} \right) \quad (0)$$

onde \hat{V}_{ref} é o valor de pico da tensão de fase fundamental que deve ser sintetizada pelo VSC.

Desse modo pode-se escrever um conjunto de tensões trifásicas de referência para para o controlador SVPWM conforme mostrado a seguir:

$$\begin{cases} v_a = m^* \left(\frac{\sqrt{3}V_d}{3} \right) \sin(\omega t - \delta) \\ v_b = m^* \left(\frac{\sqrt{3}V_d}{3} \right) \sin(\omega t - \delta - 2\pi / 3) \\ v_c = m^* \left(\frac{\sqrt{3}V_d}{3} \right) \sin(\omega t - \delta - 4\pi / 3) \end{cases} \quad (0)$$

onde m^* é o fator de modulação de amplitude dado por (0), cuja função é controlar amplitude da tensão CA gerada pelo conversor estático e consequentemente o fluxo de potência reativa de compensação; δ é um ângulo de fase genérico em (rad) das tensões de fase do conversor, cuja função é controlar o fluxo de potência ativa nos terminais do STATCOM e ω é a frequência angular fundamental do sistema em (rad/s).

A Figura 12 mostra o diagrama de blocos do controlador desenvolvido neste trabalho. O valor da tensão eficaz do barramento controlado é medida e comparada com um valor de referência. O erro relativo dessa comparação alimenta um controlador PI cuja saída é um sinal proporcional a variação do fator de modulação de amplitude Δm^* . Esse valor é somado a um valor de fator de modulação de “offset” m_0 que garante uma tensão mínima nos terminais de saída do STATCOM. Este valor mínimo do fator de

modulação garante que o compensador não irá gerar nem absorver potência reativa em seus terminais de saída quando $\Delta m^* = 0$.

Em paralelo com o controlador anterior tem-se um segundo controlador PI alimentado pelo sinal de erro obtido entre a tensão de referência CC e a tensão medida sobre o capacitor do conversor. O terminal de saída desse PI é um sinal proporcional ao ângulo de fase desejado para a tensão do STATCOM. Esse ângulo δ é somado a um sinal proporcional a frequência angular do

sistema que é fornecido por um circuito de sincronismo (PLL). Esses dois sinais são enviados para um bloco que calcula as tensões trifásicas de referência para o compensador. Essas tensões trifásicas são

então transformadas para as coordenadas $\alpha\beta$ \square \square alimentam o bloco do controlador SVPWM do conversor VSC que gera os sinais de disparo dos IGBTs do conversor conforme mostrado na Figura 11.

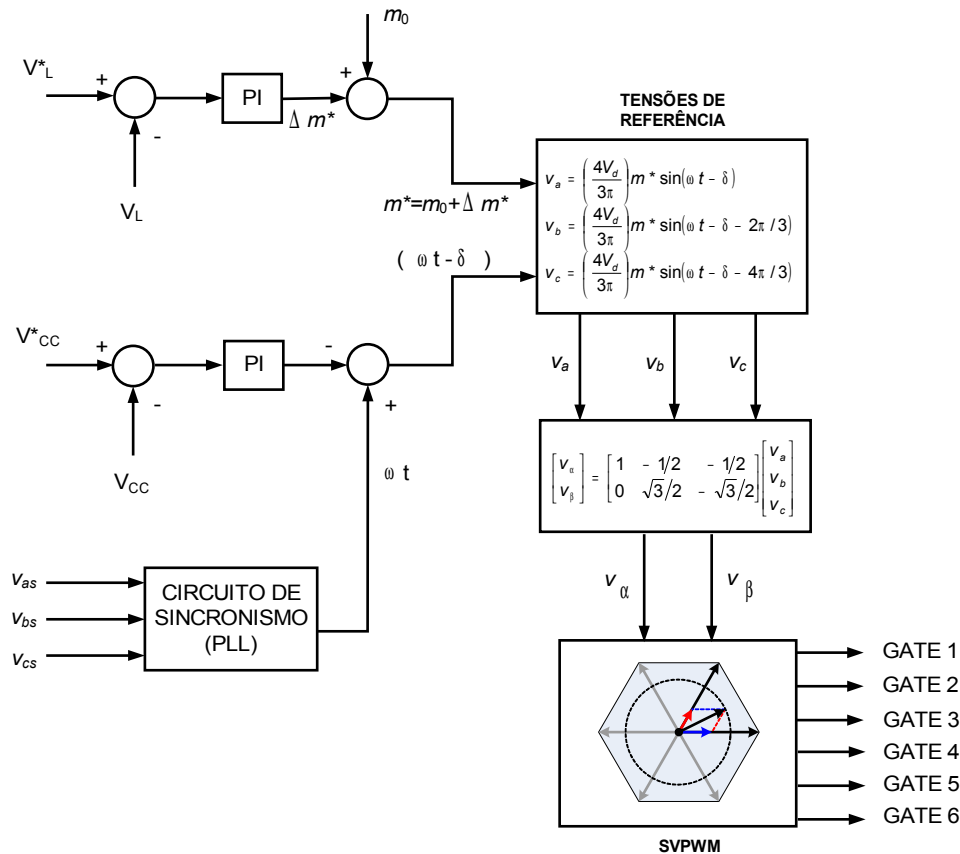


Figura 12 – Controlador do STATCOM PWM.

5 Simulações digitais

Uma topologia trifásica do sistema mostrado na Figura 1 foi implementado no programa ATP/EMTP. A carga foi modelada por uma impedância composta de duas parcelas, uma fixa e outra variável. Um filtro passivo passa-baixas, de segunda ordem e com uma frequência de corte de \square $\omega_0 = 6283,1 \text{ rad/s}$ ($f_0 = 1000 \text{ Hz}$), foi

conectado nos terminais de saída do VSC para filtrar os harmônicos de tensão gerados pela operação do conversor cuja frequência chaveamento é 5 kHz.

O valor da tensão CC do VSC foi calculado a partir (0) de maneira que o STATCOM sintetize uma tensão de fase eficaz de 1 pu (127 V) quando o fator de modulação de amplitude for 0,8 pu. As

Tabela 1 e Tabela 2 mostram os dados do sistema elétrico e do compensador estático enquanto que as Tabela 3 e Tabela 4 mostram os valores das constantes dos dois controladores PI da Figura 12.

A Figura 13 mostra a tensão sobre o capacitor CC. Até $t = 0,02$ s os pulsos de disparo dos IGBTs estão bloqueados. A partir desse instante a tensão sobre capacitor CC cresce até atingir o valor de referência. Durante esse período o regulador PI ajusta o ângulo das tensões chaveadas do STATCOM PWM forçando o

compensador a consumir potência ativa do sistema CA para carregar o capacitor CC que inicialmente estava descarregado.

Em $t = 0,4$ s, o PI responsável por controlar a amplitude da tensão CA sintetizada pelo STATCOM é habilitado. A partir desse instante o controle de tensão CA força o STATCOM a injetar potência reativa no sistema para controlar a tensão eficaz nos terminais da carga (Figura 14). Observe que o STATCOM mantém a tensão nos terminais da carga constante e igual a tensão de referência.

Tabela 1 – Dados do sistema de potência e da carga.

Grandeza	Valor
Tensão de linha da fonte CA	220 V (rms)
Reatância linha (X_L)	1 Ω
Carga RL (Parc. fixa)	5 + j 2 Ω
Carga RL (Parc. variável)	5 + j 2 Ω
Frequência base	60 Hz

Tabela 2 – Dados do STATCOM PWM.

Grandeza	Valor
Tensão CC (STATCOM)	390 V
Indutância série do filtro	1 mH
Capacitância paralela do filtro	25,2 μF
Capacitor CC	1000 μF
Freq. de chaveamento	5000 Hz

Tabela 3 – Parâmetros dos regulador PI do fator de modulação (m^*).

Ganho	Valor
K_{pm}	1,0 pu
K_{im}	2,5 pu s ⁻¹

Tabela 4 – Parâmetros dos regulador PI do ângulo de fase (ϕ).

Ganho	Valor
$K_{p\phi}$	0,0005 <i>rad</i>
$K_{i\phi}$	0,01 <i>rad s⁻¹</i>

Em $t = 1,0$ s a carga RL sofre uma variação em degrau devido a conexão da segunda parcela carga RL. A corrente fornecida pela fonte CA cresce para atender o aumento da demanda da carga. Contudo parte da energia fornecida para carga é drenada do capacitor CC do STATCOM. Esse fenômeno pode ser observado da curva mostrada na Figura 13, onde para $t = 1,0$ s, observa-se um afundamento momentâneo na tensão do capacitor do STATCOM. Essa descarga momentânea força o regulador PI da tensão CC variar a fase da tensão de saída do STATCOM para que o compensador absorva potência ativa do sistema elétrico e recarregue o capacitor do conversor.

A Figura 15 mostra o sinal de saída do controlador PI responsável por controlar o ângulo de fase da tensão de saída do STATCOM-PWM. A Figura 16 mostra o comportamento da variação do fator de modulação (m^*) da tensão de saída do STATCOM. A Figura 17 mostram as tensões trifásicas chaveadas geradas pelo STATCOM PWM. Finalmente, a Figura 18 mostra um detalhe da tensão chaveada, da tensão filtrada e da corrente de compensação referente a fase “a” do STATCOM, respectivamente. Note que a corrente de compensação está adiantada de 90° em relação a tensão do ponto de conexão do STATCOM no sistema.

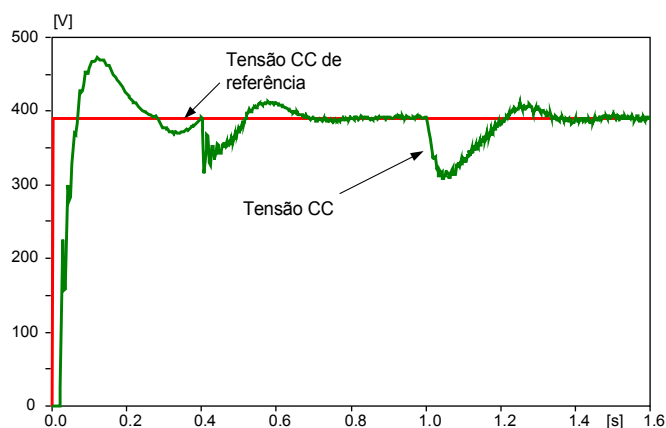


Figura 13 – Tensão CC do capacitor do STATCOM.

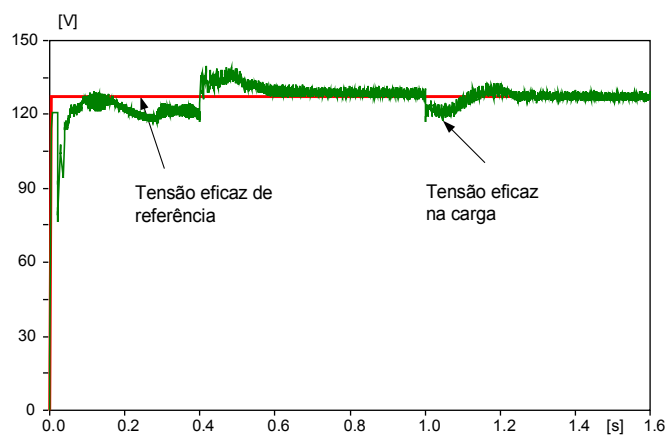


Figura 14 – Tensão eficaz nos terminais da carga RL.

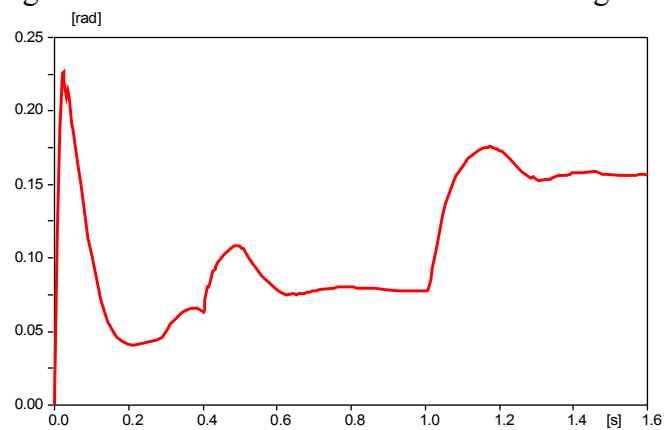


Figura 15 – Ângulo de controle (α).

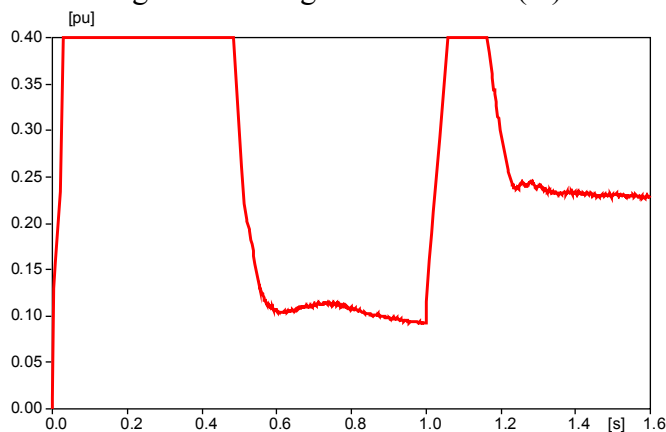


Figura 16 – Variação do fator de modulação de amplitude (m^*).

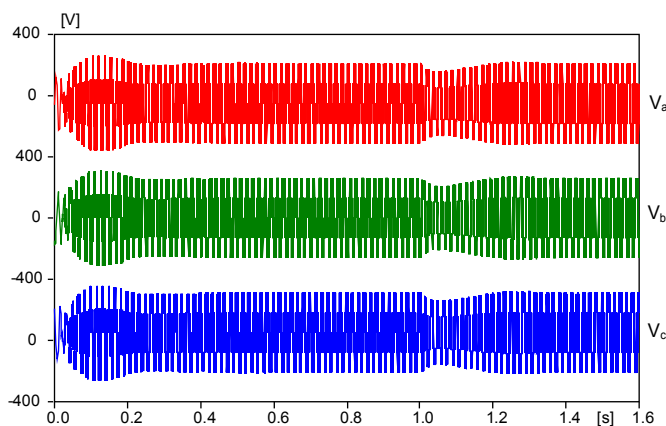


Figura 17 – Tensões chaveadas do STATCOM-PWM.

6 Conclusões

Este trabalho apresentou a modelagem de um STATCOM para aplicações em sistemas de distribuição. A topologia estudada para o conversor eletrônico de potência associada à estratégia de chaveamento utilizada tem a vantagem de reduzir as perdas por chaveamento.

Foram apresentados os princípios básicos de funcionamento do compensador estático síncrono. Compensadores estáticos são conversores destinados a serem

conectados em paralelo com os sistemas elétricos e usados para gerar/absorver potência reativa em seus terminais.

A estratégia de chaveamento utilizada para controlar o VSC foi a técnica de modulação vetorial. Esta técnica reduz o número de comutações por ciclo e pode ser implementado facilmente em DSPs. Os resultados de simulação obtido mostraram que o STATCOM pode ser utilizado para controlar a tensão de um barramento ou compensar o fator de potência de uma carga.

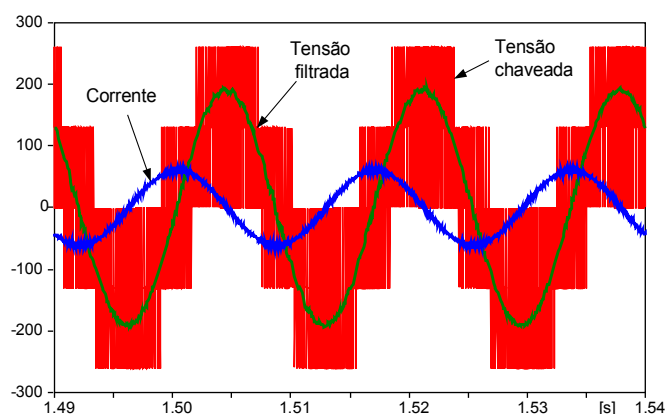


Figura 18 – Detalhe da tensão chaveada, filtrada e corrente da fase “a” do STATCOM-PWM.

7 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento

Científico e Tecnológico (CNPq) e a Universidade Federal de Juiz de Fora pela bolsa de iniciação científica concedida.

8 Referências Bibliográficas

BARBOSA, P. G. *Compensador Série Síncrono Estático Baseado em Conversores VSI Multipulsos*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

BUSO, S. Digital control of three-phase dc/ac converters: Space vector modulation – lesson 2. University of Padova, Padova, It., September, 1999.

HINGORAIN, N. G. Power eletronics in eletric utilities: Role of power eletronics in future power systems. *Proceedings of IEEE: Special Issue on Power Electronics*, vol. 76, n. 4, pp. 481-482, April 1988.

JOHN, E.M.; OSKOUI, A.; PETERSSON, A. Using a STATCOM to retire urban generation. *Proceedings of Power Systems Conference and Exposition. IEEE PES*, vol. 2, pp. 693– 698, 2004.

MORI, S.; MATSUNO, K.; TAKEDA, M.; SETI, M. Development of a Large Static Var Generator Using Self-Commutated Inverters for Improving Power System Stability. *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 8, n. 1, pp. 371-377, 1993.

OSKOUI, A. ; MATHEW, B. ; HASLER, J.P.; OLIVEIRA, M. ; LARSSON, T.; PETERSSON, A.; JOHN, E. Holly STATCOM - FACTS to replace critical generation, operational experience. *Proceedings of PES TD 2005/2006*, pp. 1393–1398, May 2006.

PINHEIRO, H.; BOTTERÓN, F.; RECH, C.; SCHUCH, L.; CAMARGO, R.F.; HEY, H.L.; GRÜNDLING H.A.; PINHEIRO, J. R. Modulação space vector para inversores alimentados em tensão: Uma abordagem unificada. *Revista Controle e Automação*, vol. 16, n. 1, pp. 13 – 24, 2005.

REED, G.; PASERVA, J.; CROASDAILE, T.; TAKEDA, M.; HAMSAKI, Y.; ARITSUKA; MORISHIMA, T. N.; JOCHI, S.; IYODA, I.; NAMBU, M.; TOKI, N.; THOMAS, L.; SMITH, G., LAFOREST, D. ; ALLARD, W.; HAAS, D. The VELCO STATCOM based transmission system project. *Proceedings of Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE*, volume 3, pp. 1109–1114, 2001.

SCARFONE, A.W.; HANSON, D.J.; HORWILL, C.; ATEN, M. Dynamic performance studies for a ± 150 MVar STATCOM for Northeast Utilities. *Proceedings of Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES*, vol. 3, pp.1170– 1174, Sept 2003.

SCHAUDER, C.; GERNHARDT, M.; STACEY, E.; LEMAK, T., GYUGYI, L., CEASE, T. W.; EDRIS, A. Operation of $\square 100$ Mvar TVA STATCON. *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 12, n. 4, Oct, pp.1805-1811, 1997.

VILLALVA, M. G. Estudos e aplicações de filtros ativos paralelos para sistemas trifásicos com quatro fios. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

WATANABE, E.; AREDES, M.; BARBOSA, P.G. Flexible AC transmission systems. In.: RASHID, M.H. Power Electronics Handbook. Academic Press, 2nd edition, 2007.

WATANABE, E. H.; AKAGI, H.; AREDES, M. The p-q theory for active filter control: Some problems and solutions. Revista Controle e Automação, vol. 15, n. 1, pp. 78-84, 2004.

WATANABE, E. H.; BARBOSA, P. G.; ALMEIDA, K. C.; TARANTO, G. N. Tecnologia facts – tutorial. Revista Controle & Automação, vol. 9, pp. 39-55, 1998.